

DYNAMIC RESPONSE OF A HIGH BUILDING IN STRONG WIND

J. Král*

Summary: *Repeated cold front transitions in January 2007 in the Czech Republic were accompanied by occurrences of strong winds. Before the strongest one, accelerometers and a recorder have been placed on the high building Shiran Tower (formerly VUMS) in the Prague west end. A dynamic part of the building response to the wind gusts in this period has been recorded. The paper includes dynamic features of the building, standard effects of wind, measuring results and corresponding meteorological information from the station Prague Ruzyně.*

1. Úvod

Dynamické účinky větru byly sledovány na budově Shiran Tover (dříve VÚMS), která je umístěna na malém kopci ve Vokovicích na západním okraji Prahy. Z hlediska účinků větru je budova zajímavá svou velikostí, umístěním a orientací vzhledem ke směru převažujících silných větrů v ČR. Delší osa průřezu budovy je orientovaná ve směru S-J (azimut cca 4,5°). To znamená, že při západním větru je delší strana průřezu přibližně kolmá na směr větru.

Na západní straně budovy jsou těsně před ní haly bývalého závodu Aritma Vokovice vysoké cca 8 m - 10 m a dále je zalesněný terén Divoké Šárky s nižší nadmořskou výškou než pata budovy. Potom se terén postupně zvedá na plošinu s letištěm Praha Ruzyně, kde je nejbližší meteorologická stanice (vzdálenost 6 km, azimut cca 268°), nadmořská výška stanice 364 m). Nadmořská výška paty budovy je 300 m. Mezi touto stanicí a budovou Shiran Tower jsou objekty starého letiště a západní okraj zástavby čtvrti Praha - Liboc.

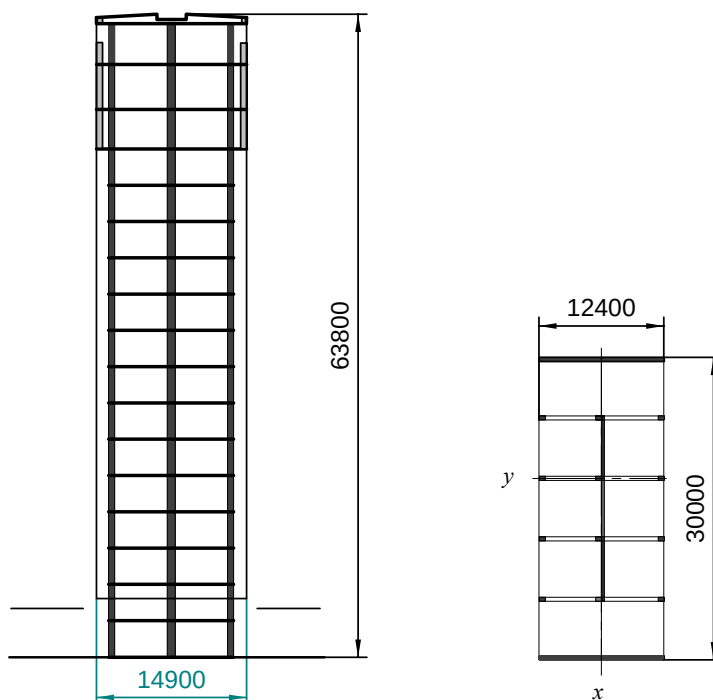
2. Budova

Administrativní budova má 16 podlaží a dvě střechy. Po rekonstrukci obvodového pláště je 63,8 m vysoká, má průřez 31 m x 14 m a kratší krajní stěny včetně architektonických prvků mají šířku 14,9 m. Nosný systém se nezměnil. Podle [Pirner, 1973] tvoří nosný systém dvě stěny 12,4 m dlouhé na krajích budovy tloušťky 0,35 m, orientované ve směru kratšího rozměru, jedna 18 m dlouhá podélná stěna tloušťky 0,2 m ve středu průřezu a montovaná železobetonová rámová konstrukce se třemi řadami sloupů. Krajní řady sloupů mají průřez 0,4 x 0,6 m a střední řada má průřez 0,4 x 0,8 m - viz obrázek 1. Její hmotnost byla v roce 1972 podle statického výpočtu 7680 t. Je založena na skalním masivu a není podsklepena.

V roce 1972 byly na této budově provedeny dynamické zkoušky s impulsními raketovými motory s cílem zjistit vlastní frekvence a tvary kmitání. Podle zkoušek popsanych v [Pirner, 1973] byla nejnižší vlastní frekvence ve směru kratšího rozměru $f_1 = 0,83$ Hz (směr y), tvar kmitání byl na krajích budovy téměř lineární. Z dokmitávání budovy byl vyhodnocen

* Ing. Jaromír Král, CSc., ČVUT Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha, e-mail: jkral@klok.cvut.cz

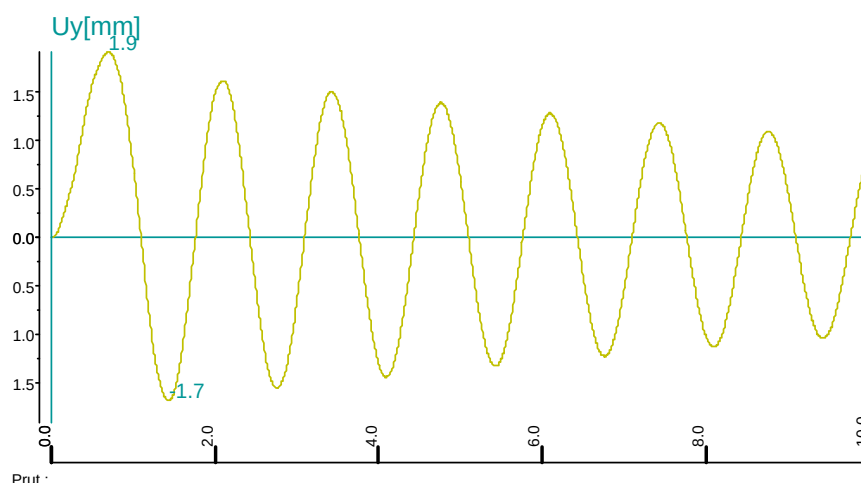
logaritmický dekrement útlumu $d = 0,074$. Při použití dvou dvojic raketových motorů ve výšce 58,8 m byl celkový impuls síly 40 kNs a maximální dvojamplituda výchylky ve výšce 63 m byla 1,8 mm na kraji budovy (2 s po odpálení raket). V době zkoušky byla ve výšce 60 m střední rychlost větru 10 –13 m/s, která způsobovala kmitání budovy s dvojamplitudou 0,13 mm (ve výšce 63 m).



Obrázek 1 Schéma vysoké budovy (po rekonstrukci)

Na základě dostupných podkladů jsme sestavili výpočtový model budovy v programu NEXIS 3.2 tak, aby dynamické vlastnosti modelu vycházely z výsledků měření s raketovými motory v roce 1972 a odpovídaly současnému stavu, tj. poznatkům z měření v roce 2007. Současný vlastník nemá k dispozici úplnou dokumentaci budovy, proto byly při jejím modelování využity dříve publikované informace. Model je proto určen pouze pro srovnávání odezvy budovy na různá zatížení větrem.

Budova byl modelována jako prostorový rám se dvěma příčnými stěnami na krajích a podélnou stěnou uprostřed. Další popis modelu neuvádím, protože nemá přímou souvislost s cílem příspěvku. V tabulce 1 jsou uvedeny nejnížší vypočtené a naměřené vlastní frekvence, které byly získány z frekvenční analýzy záznamů zrychlení. Viz také obrázek 6. Vypočtený časový průběh odezvy na impuls raketových motorů 40 kNs na kraji budovy ve výšce 63 m je na obrázku 2. Amplituda výchylky je 1,6 mm (2 s po odpálení raket, $\delta = 0,074$).



Obrázek 2 Vypočtená odezva na impuls raketových motorů ve směru y na okraji budovy ve výšce 63 m. (výstup programu NEXIS 3.2)

Tabulka 1 Vypočtené a naměřené vlastní frekvence budovy

Měření f [Hz]	Výpočet f [Hz]	tvar
0,69 - 0,75	0,74	ohyb v rovině YZ – 1.
1,00	0,90	kroucení kolem osy Z – 1.
1,75	1,42	ohyb v rovině XZ – 1.
2,94	3,57	ohyb v rovině YZ – 2.

3. Výpočet účinků větru podle norem pro zatížení větrem

Zatížení bylo stanoveno podle ČSN 73 0035 a ČSN EN 1991-1-4. Pro výpočet odezvy byl použit výše uvedený výpočtový model budovy.

Podle ČSN 73 0035 jde o konstrukci citlivou na dynamické účinky větru a je třeba postupovat podle přílohy 2 v normě. Zatížení je vypočteno pro terén typu A ve IV.oblasti ($w_0 = 0,55 \text{ kN/m}^2$). Pro směr větru kolmý na širší stranu budovy je tvarový součinitel pro návětrnou stranu $C_e = 0,8$ a pro závětrnou stranu $C_e = -0,6$. Ekvivalentní flukтуаční zatížení bylo vypočteno podle článku P.2.8 pro budovy s přibližně rovnoměrně rozdělenou hmotností a tuhostí po výšce a lineárním tvarem kmitání. Budova byla rozdělena na 10 úseků, pro ně byly stanoveny hodnoty $\kappa(z)$ (tab. P.2.2), $\delta_w(z)$ podle vztahu P17a, $\nu = 0,42$ a $\delta_{(1)} = 9,082$ pro logaritmický dekrement útlumu $\delta = 0,1$ podle vztahu P22b. Model budovy byl zatížen normovými hodnotami sil od střední složky zatížení a ekvivalentního statického zatížení od flukтуаční složky zatížení. Byla vypočtena celková statická deformace budovy ve výšce 63 m. Je uvedena v tabulce 2 společně s odpovídajícími hodnotami deformace od výpočtového zatížení pro součinitel zatížení $\gamma_f = 1,3$.

Výpočet podle ČSN EN 1991-1-4 byl proveden pro terén typu II. v oblastech s referenční rychlostí 25 m/s a 27,5 m/s. Podle pokynů v normě byla návětrná strana rozdělena na tři oblasti (dolní do výšky z [m] $\in <0;30>$, střední v pásmu $\in <30;33,8>$ a horní $\in <33,8;63,8>$), referenční výšky byly voleny na horním okraji pásma, součinitele vnějšího tlaku jsou $c_{pe,10} = 0,8$ pro návětrnou stranu a $c_{pe,10} = -0,7$ pro závětrnou stranu a podrobným postupem podle přílohy B byla vypočtena hodnota součinitele konstrukce $c_s c_d = 0,89$ pro hodnotu logaritmického dekrementu útlumu $\delta = 0,1$. Pro takto definované charakteristické ekvivalentní zatížení a odpovídající návrhové zatížení pro součinitel zatížení $\gamma_Q = 1,5$ byly vypočteny deformace ve středu budovy ve výšce 63 m. Jsou uvedeny v tabulce 2. Podle přílohy B lze také stanovit charakteristickou směrodatnou odchylku a charakteristickou maximální hodnotu zrychlení ve výšce 63 m. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 Vypočtené hodnoty odezvy na vrcholu budovy od normových zatížení

Norma	posunutí [mm])				zrychlení [mm/s ²]	
	normové zatížení	výpočtové zatížení	charakter. zatížení	návrhové zatížení	$\sigma_{a,x,char}$	$a_{x,peak}$
ČSN 73 0035	21,4	27,8	-	-	-	-
ČSN EN 1991-1-4 (25 m/s)	-	-	29,0	43,5	35,3	122
ČSN EN 1991-1-4 (27,5 m/s)	-	-	35,1	52,7	39,5	137

4. Meteorologické informace

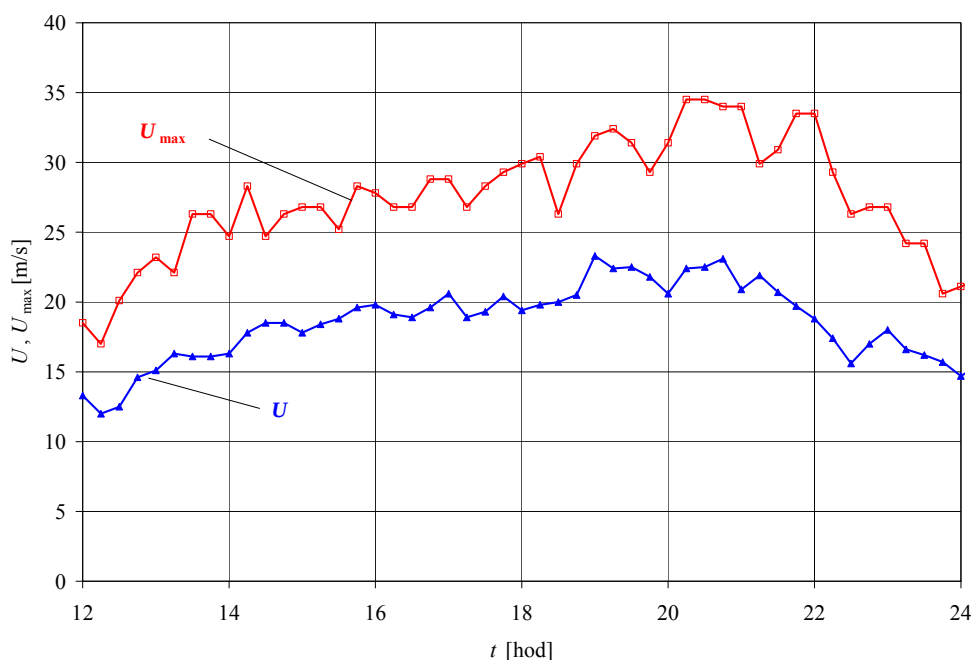
V 18. a 19. ledna 2007 přecházela přes území ČR studená fronta doprovázená bouřemi a velmi silným větrem. Tato situace je označována jako orkán Kyrill. Bylo zasaženo celé území ČR, ale síla větru byla místně velmi rozdílná. Na řadě míst byly naměřeny rekordní nárazy větru, zejména na vrcholech hor (Sněžka, Milešovka apod.) a mimo jiné i ve stanici Praha – Karlov. To je ale nestandardně umístěná stanice, u které se projevil velký vliv konfigurace terénu pro daný směr větru. V nižších nadmořských výškách závisely účinky větru na směru větru a konfiguraci terénu.

V severozápadní části Prahy byly největší nárazy větru zaznamenány 18.1.2007 večer. Vítr sílil od rána a v době od 19:00 do 20:30 byly ve stanici Praha - Ruzyně zaznamenány největší střední rychlosti a nárazy větru. Potom vítr zeslábl a před půlnocí skokem změnil směr z 240° - 250° na 280° - 300° a jeho rychlost dále klesala. Situace se opakovala ještě 19.1.2007, ale rychlosti větru zde dosáhly zhruba 60 % hodnot z 18.1.2007. Maximální naměřená desetiminutová střední rychlost byla v této stanici 23,3 m/s (zhruba 10leté maximum) a maximální náraz větru byl 34,5 m/s (zhruba 5leté maximum). Klasifikace odhadů byla provedena na základě rozborů ve zprávě Král (2002). V tab. 3 jsou tyto rychlosti porovnány s maximálními naměřenými rychlostmi v období od roku 1961 a jejich statistickými odhady pro roční pravděpodobnost výskytu $p = 0,02$ Král (2006). Rychlosti větru v této stanici dne 18.1.2007 zdaleka nedosáhly dříve naměřených maximálních hodnot ani statistických odhadů, použitých např. pro konstrukci mapy větrných oblastí. Přesto došlo na některých objektech letiště ke značným škodám.

Poměr naměřeného nárazu větru a střední desetiminutové střední rychlosti (1,48) odpovídá terénu typu II. V terénu typu II podle ČSN EN 1991-1-4 je ve výšce 63,8 m střední rychlost větru 31,7 m/s. V době největších nárazů větru byl směr větru cca 245°. Za předpokladu, že tato situace platila i v prostoru budovy, byl směr větru odchýlen o cca 30° od kolmice na delší stranu průřezu budovy. Pokud vymežíme trvání maxima poklesem střední rychlosti o 10 %, trvala tato situace cca 2 hodiny s malou prodlevou (15 minut) uprostřed tohoto intervalu. Průběhy středních rychlostí a nárazů větru ve stanici Praha-Ruzyně jsou na obrázku 3.

Tabulka 3 Srovnání naměřených rychlostí se statistickými odhady ve stanici Praha –Ruzyně

Rychlosti	Maximum naměřené [m/s]	Odhad pro $p = 0,02$ [m/s]	Měření 18.1. 2007- (Kyrill) [m/s]	Poměr Kyrill/odhad [%]
Střední rychlost (10 min)	27,0	26,2	23,3	89
Náraz větru	45,0	46,5	34,5	74



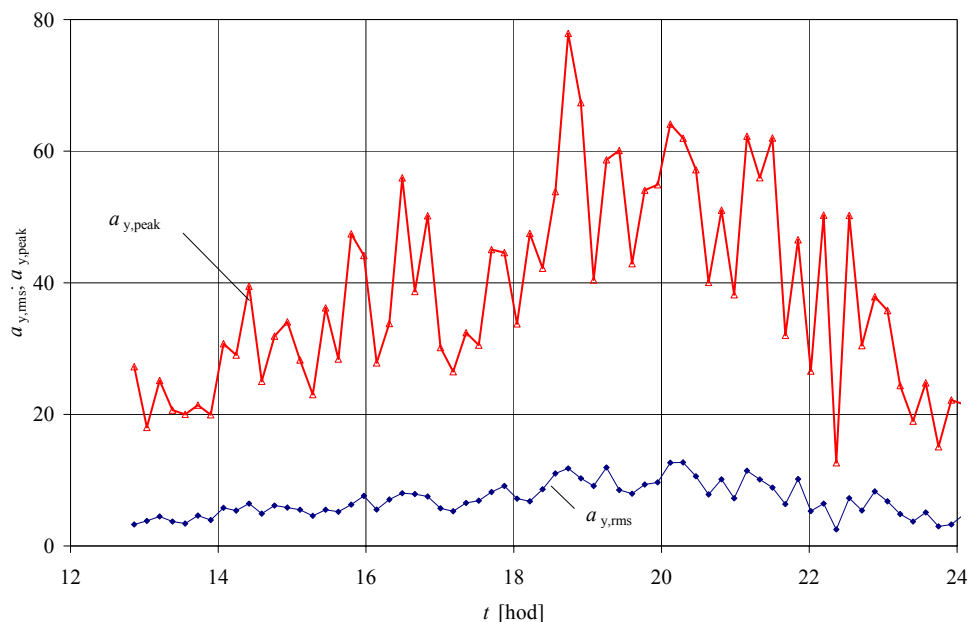
Obrázek 3 Střední rychlosti U a nárazy větru $U_{\max}$ ve stanici Praha Ruzyně dne 18.1. 2007 odpoledne a večer.

5. Odezva budovy

ČHMÚ avizoval nebezpečí extrémních rychlostí větru na území ČR již ve čtvrtek ráno. Z dostupných zařízení se podařilo zkompletovat automatickou měřicí linku a po dohodě

s vlastníkem objektu ji instalovat v 15. podlaží výše popsané budovy. Byly použita měřicí linka firmy Bruel&Kjaer: dva snímače zrychlení typ 4379 a dva zesilovače náboje typ NEXUS. Jako záznamové zařízení jsme použili počítač IBM TP765L s převodníkem A/D Keithley a řídicí program „ZAZNAM“, vytvořený v prostředí TestPoint. Snímače byly upevněny na montážní destičce a umístěny na podlaží v SZ rohu budovy tak, že jeden z nich měřil zrychlení v směru delší strany a druhý ve směru kratší strany budovy. Měřený signál byl frekvenčně omezen vestavěnými propustmi zesilovače náboje v pásmu 0,2 Hz až 100 Hz, frekvence vzorkování byla 1024 Hz/kanál.

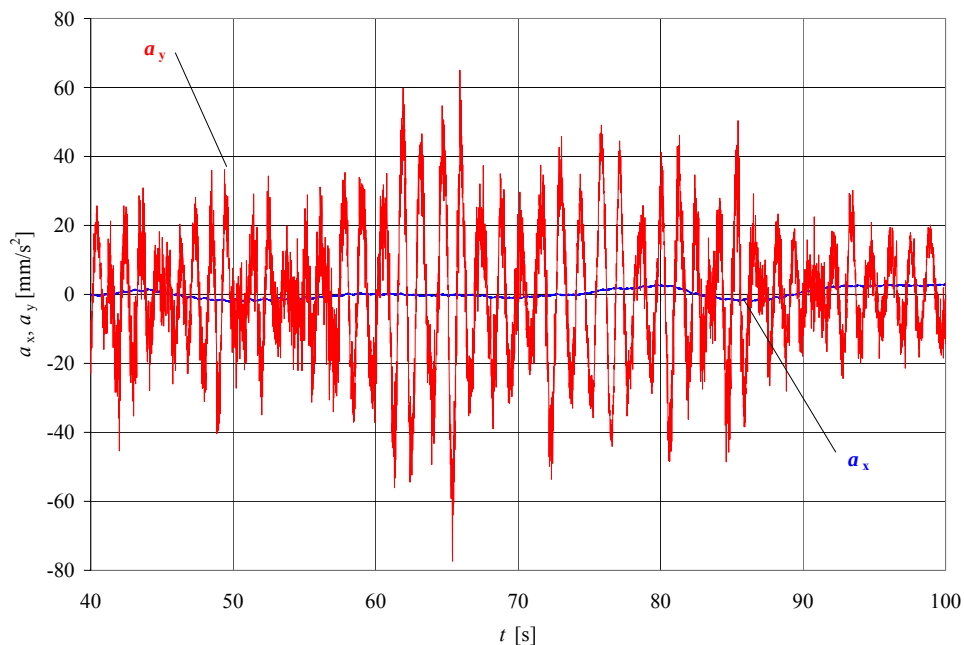
Záznamy byly 300 s dlouhé a mezi nimi byla prodleva také 300 s. Sledování odezvy budovy bylo zahájeno 18.1.2007 ve 12:51 a skončilo v 01:01 dne 19.1.2007 po výpadku proudu v budově. Celkem bylo provedeno 72 záznamů kmitání budovy. Na obrázku 4 jsou vyneseny naměřené směrodatné odchylky a maximální výkmity zrychlení v příčném směru (směr y) z jednotlivých záznamů. Časová osa je stejná jako na obrázku 3. Hodnoty zrychlení ve směru y korelují se změnami rychlostí větru na obrázku 3. V směru x byla odezva budovy velmi malá. Na obrázku 5 je ukázka časového průběhu zrychlení (maximální výkmit ve směru y je $77,4 \text{ mm/s}^2$). Je to část záznamu započatého v 18:40. Integrací lze získat průběh rychlosti kmitání (maximální výkmit je 12 mm/s , $f = 0,75 \text{ Hz}$) a dynamické výchylky (maximální výkmit je $2,8 \text{ mm}$, $f = 0,75 \text{ Hz}$). Na obrázku 6 je spektrum zrychlení ve směru y. Na svislé ose jsou vyneseny efektivní hodnoty zrychlení v intervalu 300 s (celý záznam). Vzhledem k tomu, že spektrum flukuační složky tlaku větru je ploché a strojní vybavení bylo vypnuto, odpovídají vrcholy spektra s největší pravděpodobností vlastním frekvencím budovy. Tyto otázky budou analyzovány později.



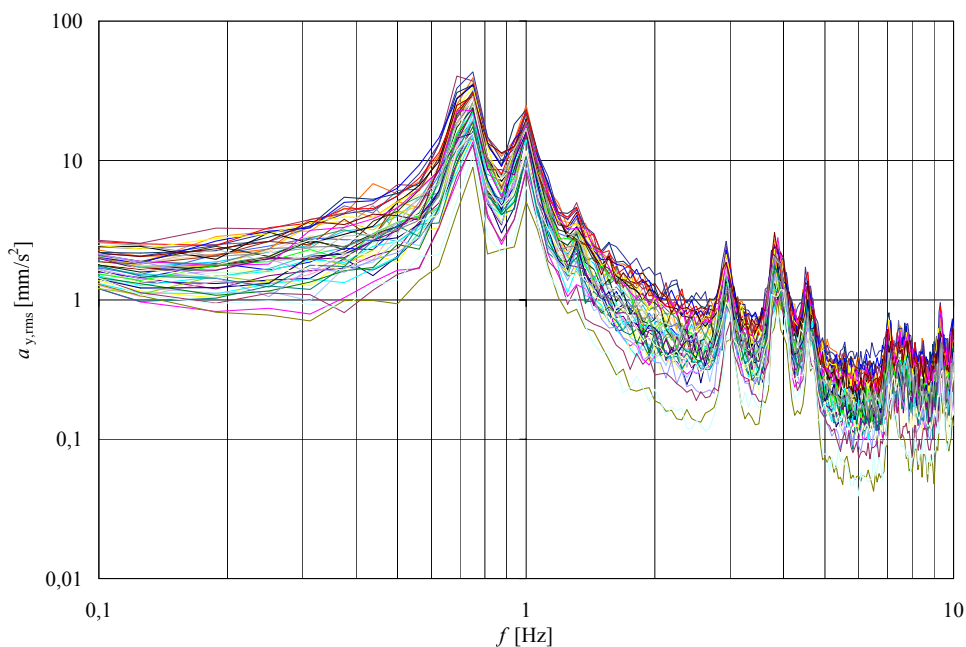
Obrázek 4 Směrodatné odchylky a výkmity zrychlení ve směru y.

Podle provedeného měření je maximální amplituda výchylky v 1. vlastním tvaru kmitání $2,8 \text{ mm}$ a směrodatná odchylka přibližně $0,82 \text{ mm}$. Ekvivalentní statická výchylka podle Eurokódu je po přepočtu na naměřenou střední rychlost větru $25,2 \text{ mm}$. Směrodatná odchylka

činí tedy 3,3% a maximální výkmit 11,1% ekvivalentní výchylky budovy. V celém sledovaném období byly v místě měření (15.podlaží) překročeny přípustné hodnoty zrychlení pro nemocnice, školy, obytné budovy a pro kanceláře, stanovené nařízením vlády ČR.



Obrázek 5 Detail záznamu zrychlení



Obrázek 6 Spektra zrychlení na 15. podlaží budovy ve směru y (efektivní hodnoty, okraj budovy) ze všech záznamů.

6. Závěr

Byl změřeny dynamické účinky větru na vysoké budově. Naměřené hodnoty byly srovnávány s hodnotami odezvy od normových zatížení pro návrhové rychlosti a střední rychlosti v době měření. Výsledky potvrdily, že při silném větru může u budov tohoto typu větru vzniknout kmitání, které omezuje použitelnost části objektu. To potvrzuje subjektivní pocity uživatelů podobných objektů. Současně byla potvrzena reálnost výpočtu maximálního zrychlení podle Eurokódu.

7. Poděkování

Mapa rychlostí větru byla zpracována na základě výsledků řešení projektů GA ČR č. 103/06/1522. Autoři by touto cestou chtěli poděkovat za poskytnutí prostředků na řešení projektů. Finanční prostředky na dokončení mapy poskytl ČNI.

8. Literatura

Pirner, M., (1973): Dynamické charakteristiky vysokých budov při velmi malých buzeních. Stavebnický časopis SAV, XXI 2; Bratislava.

Král, J. (2002) Odhady desetiminutových rychlostí a nárazů větru v ČR pro různé střední doby návratu, ČVUT, Kloknerův ústav, 37 s. Praha

Král, J. (2006) Influence orography on design wind speeds in the Czech Republic, IM 2006, Svratka, 12 p.

ČSN 730035 (1986) Zatížení stavebních konstrukcí, ÚNM, Praha.

ČSN EN 1991-1-4 (2007) Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem, ČNI, Praha.